

УДК 524.387

ОСОБЕННОСТИ ДИНАМИКИ РЕНТГЕНОВСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ АСТРОФИЗИЧЕСКИХ ОБЪЕКТОВ: КЛАССИФИКАЦИЯ ЭФФЕКТОВ СТАТИСТИЧЕСКОЙ ПАМЯТИ

С.А. Дёмин, О.Ю. Панищев, Ю.А. Нефедьев, Н.Ю. Вараксина

Аннотация

Показано, что анализ сигналов полного потока рентгеновской активности микроквазаров, фиксируемых обзорной камерой ASM (All-Sky Monitor) орбитальной обсерватории RXTE (Rossi X-Ray Timing Explorer), позволяет не только установить некоторые механизмы аккреции вещества в двойных звездных системах, но и провести их классификацию в зависимости от проявления эффектов статистической памяти. В качестве примера с помощью частотных зависимостей корреляторов и их производных, вычисляемых на основе формализма функций памяти, выявляются особенности рентгеновского излучения двойной системы Cygnus X-1. Выделены три класса астрофизических объектов в зависимости от соотношения временных масштабов релаксации и существования статистической памяти.

Ключевые слова: эффекты статистической памяти, рентгеновская активность, двойные рентгеновские системы, Cygnus X-1.

1. Особенности эволюции сложных систем

Возросший интерес к математическому описанию сложных систем на основе подходов теоретической физики для равновесных и неравновесных систем, нелинейной динамики и теории динамического хаоса, разнообразных дискретных и непрерывных отображений способствовал широкому распространению методов статистического анализа временных последовательностей экспериментальных показателей, генерируемых такими системами. В связи с этим закономерно стали возникать вопросы, связанные с извлечением из сигналов разной сущности информационно значимых параметров, способствующих установлению структурной организации и эволюции сложных систем.

В широком смысле *сложная система* – составной объект, части которого рассматриваются как системы, закономерно объединенные в единое целое в соответствии с определенными принципами или связанные между собой заданными отношениями. Уоррен Уивер (Warren Weaver) уточняет это определение тем, что сложность характеризуется уровнем трудности в предсказании свойств системы, если свойства отдельных частей заданы [1]. Другими словами, сложная система предполагает наличие в ней составных элементов, совокупности связей между элементами, а также пространств состояний. Сложность здесь будет проявляться через вероятность возникновения различных состояний и зависеть от уровня детализации (масштабирования) [2, 3]. В физике сложная система наделяется следующими свойствами: большое число взаимосвязанных степеней свободы (вследствие чрезвычайно высокой размерности); присутствие обратной связи у некоторых переменных; возникновение случайного, непредсказуемого поведения при внешних

воздействиях, то есть нарушение установленных функциональных взаимосвязей; существенная изменчивость фиксируемых параметров (широкая область распределения); смена плавной эволюции внезапными периодами нестационарности – участками «стохастического дрейфа»; наличие механизмов самоорганизации и самонастройки, степенных распределений и масштабных преобразований.

Несмотря на интенсивное развитие методов статистического анализа временных сигналов, сохраняются определенные трудности в анализе долговременных корреляций – дальнего порядка взаимосвязей фиксируемых параметров, эффектов последствия (статистической памяти), возникающих в силу природы исследуемых объектов. Кроме того, так как измерение параметров, характеризующих динамические состояния системы, выполняется в определенные моменты времени, набор величин, входящих в состав временной последовательности, оказывается дискретным. Это приводит к необходимости перехода при теоретическом описании сложных систем от непрерывных функций и интегро-дифференциальных уравнений к дискретным аналогам [4]. Весьма эффективным аналитическим средством описания временных корреляций, а также эффектов статистической памяти оказалась теория кинетических уравнений Цванцига и Мори [5–9].

В настоящей работе в рамках формализма функций памяти (ФФП) – дискретного обобщения уравнений Цванцига–Мори на случай анализа временных сигналов [10, 11], продуцируемых сложными системами, будет проведено исследование корреляций в динамике интенсивности рентгеновского излучения 19 микровязаров. Микровязары – тесные двойные системы, состоящие из черной дыры или нейтронной звезды и оптической звезды-компаньона, для которых характерна струйная активность в виде джетов. ФФП-параметры позволят классифицировать рентгеновское излучение двойных звездных систем путем сопоставления и сравнения временных масштабов релаксации и существования статистической памяти. Более подробно мы остановимся на анализе динамики корреляций в рентгеновской активности двойной системы Cygnus X-1.

2. Формализм функций памяти

Ранее в работах [10, 11] было предложено следующее аналитическое выражение цепочки взаимосвязанных конечно-разностных кинетических уравнений для дискретной временной корреляционной функции (ВКФ) $a(t) = M_0(t)$ и функций памяти $M_s(t)$, $s = 1, 2, \dots$:

$$\frac{\Delta M_{s-1}(t)}{\Delta t} = \lambda_s M_{s-1}(t) - \tau \Lambda_s \sum_{j=0}^m M_s(j\tau) M_{s-1}(t - j\tau). \quad (1)$$

Здесь λ_s и Λ_s – кинетические и релаксационные параметры соответственно. Нормированная ВКФ представлена в виде скалярного произведения

$$a(t) = \frac{\langle \mathbf{A}_k^0(0) \cdot \mathbf{A}_{m+k}^m(t) \rangle}{\langle |\mathbf{A}_k^0(0)|^2 \rangle} \quad (2)$$

векторов начального и текущего (в момент времени t) состояний:

$$\mathbf{A}_k^0(0) = \{\delta x_0, \delta x_1, \delta x_2, \dots, \delta x_{k-1}\} = \{\delta x(T), \delta x(T + \tau), \dots, \delta x(T + (k-1)\tau)\}, \quad (3)$$

$$\begin{aligned} \mathbf{A}_{m+k}^m(t) &= \{\delta x_m, \delta x_{m+1}, \delta x_{m+2}, \dots, \delta x_{m+k-1}\} = \\ &= \{\delta x(T + m\tau), \delta x(T + (m+1)\tau), \dots, \delta x(T + (m+k-1)\tau)\}. \end{aligned} \quad (4)$$

Интенсивность рентгеновской активности микроквазаров описывается временной последовательностью $\{x_j\}$ величины $X = \{x(T), x(T + \tau), \dots, x(T + (N - 1)\tau)\}$. Здесь T – начальный момент регистрации, $(N - 1)\tau$ – время регистрации сигнала, τ – временной шаг дискретизации, $x_j = x(T + j\tau)$ – значение X на j -м шаге и флуктуация определяется как $\delta x_j = x_j - \langle X \rangle$. В работах [12, 13] проведено обобщение ФФП на случай анализа неэквидистантных во временном отношении сигналов, генерируемых сложными системами.

Соотношения (1) представляют уравнения движения для взаимосвязанных динамических переменных. Динамика остальных степеней свободы скрыта в функциях памяти, статистически связанных с быстро флуктуирующими остаточными силами. Функциональная структура предлагаемых кинетических уравнений является универсальной и не зависит от природы исследуемой системы. Отметим, что функции памяти характеризуют различные взаимосвязи между скоростью изменения случайных переменных на разных уровнях статистического описания. Исключительное значение памяти было осознано в естественных науках после 1906 г. Тогда знаменитый русский математик А.А. Марков опубликовал свою первую статью о процессах, получивших впоследствии название марковских, сыгравшую историческую роль в развитии теории случайных процессов. В ней впервые было сформулировано представление о мгновенной статистической памяти случайного процесса с точки зрения его предьстории.

Заметим, что вид конечно-разностных уравнений для функций памяти (1) напоминает цепочку немарковских интегро-дифференциальных кинетических уравнений Цванцига и Мори, широко используемых для исследования необратимых процессов в конденсированных средах [5–9]:

$$\frac{dM_i(t)}{dt} = -\Omega_{i+1}^2 \int_0^t d\tau M_{i+1}(t - \tau) M_i(\tau), \quad i = 1, 2, \dots \quad (5)$$

Здесь Ω_{i+1} – релаксационные параметры, имеющие размерность частоты.

3. Меры статистической памяти

С физической точки зрения временные масштабы процессов, связанные с корреляциями и эффектами памяти, не могут быть произвольными. Поэтому для количественного сопоставления и сравнения этих процессов используются различные статистические показатели. Для количественной оценки степени марковизации и демарковизации необратимых процессов в конденсированных средах на различных релаксационных уровнях статистического описания, путем сопоставления времен существования корреляций и памяти в системе, в работах [14, 15] был введен параметр немарковости

$$\varepsilon = \frac{\tau_{\text{rel}}}{\tau_{\text{mem}}}. \quad (6)$$

В более поздних работах (см., например, [16, 17]) был предложен статистический спектр параметра немарковости:

$$\{\varepsilon\} = \{\varepsilon_1, \varepsilon_2, \dots, \varepsilon_{n-1}\}, \quad (7)$$

где компоненты ε_i определяются в виде, аналогичном выражению (6). Времена существования памяти на разных релаксационных уровнях рассчитываются из экспериментальных данных: $\tau_{M_0} = \Delta t \sum_{j=0}^{N-1} M_0(t_j)$, \dots , $\tau_{M_{n-1}} = \Delta t \sum_{j=0}^{N-1} M_{n-1}(t_j)$.

Затем соответствующие меры были введены для анализа эффектов статистической памяти временных сигналов, генерируемых сложными системами. Более удобным оказалось обобщение информационной меры $\varepsilon_i(\nu)$ для частотно-зависящего случая [10, 11]:

$$\varepsilon_i(\nu) = \left\{ \frac{\mu_{i-1}(\nu)}{\mu_i(\nu)} \right\}^{1/2}. \quad (8)$$

Здесь $\mu_i(\nu)$ представляет собой спектр мощности соответствующей функции памяти i -го порядка $M_i(t)$:

$$\mu_i(\nu) = \left| \Delta t \sum_{n=0}^{N-1} M_i(t_j) \cos(2\pi\nu t_j) \right|^2. \quad (9)$$

Дальнейшие исследования эффектов статистической памяти [18] привели к новой информационной мере памяти:

$$\delta_i(\nu) = \left| \frac{\widetilde{M}'_{i-1}(\nu)}{\widetilde{M}'_i(\nu)} \right|, \quad (10)$$

где $\widetilde{M}'_i(\nu) = d\widetilde{M}_i/d\nu$, $\widetilde{M}_i(\nu)$ – фурье-образ функции памяти i -го порядка. Набор частотных зависимостей (10) используется для описания скорости потери корреляционных связей на соответствующих релаксационных уровнях.

Информационные меры памяти $\varepsilon = \varepsilon_1(0)$, $\delta = \delta_1(0)$ позволяют устанавливать уровень проявления эффектов статистической памяти в долговременной составляющей временных сигналов интенсивности рентгеновского излучения микроквазаров. Если $\varepsilon \gg 1$ или $\delta \gg 1$, то рассматриваемый стохастический процесс является марковским (случайным). В этом случае время существования памяти в системе намного короче, чем время релаксации исходной ВКФ. Эволюция системы характеризуется слабой (короткой) статистической памятью. В пределе при $\varepsilon \rightarrow \infty$ или $\delta \rightarrow \infty$ процесс характеризуется дельта-образной памятью. Уменьшение параметра характеризует увеличение времени существования памяти. В случае $\varepsilon \approx 1$ или $\delta \approx 1$ процесс характеризуется долговременной (сильной) статистической памятью. Тогда время существования памяти соизмеримо с временем релаксации исходной ВКФ. При $\varepsilon > 1$ или $\delta > 1$ исследуемый процесс можно рассматривать как квазимарковский с умеренной (промежуточной по времени существования) статистической памятью.

Заметим, что изначально нельзя говорить об определенном марковском или немарковском характере рентгеновского излучения микроквазаров, которое связано с разнообразными физическими процессами, в том числе и с аккрецией вещества. Установление специфических особенностей данных процессов представляет собой отдельную и достаточно трудоемкую задачу, требующую проведения дальнейшего статистического анализа временных сигналов, генерируемых двойными звездными системами в разных диапазонах энергий. В частности, в работе [19] отмечено, что рентгеновские наблюдения со специальных спутников позволяют судить о наличии компактного объекта в двойной системе, а по быстрой переменности рентгеновского излучения, вплоть до 10^{-3} с, – оценивать его характерные размеры. В то же время оптические наземные наблюдения дают возможность исследовать движение оптической звезды и тем самым оценить массу компактного объекта.

4. Экспериментальные данные. Особенности рентгеновского излучения двойной системы Cygnus X-1

Регистрация рентгеновского излучения микроквазаров осуществлялась обзорной камерой All-Sky Monitor (ASM) орбитальной рентгеновской обсерватории Rossi X-Ray Timing Explorer (RXTE) (URL: <http://xte.mit.edu>) (см. также [20]) с 1 января 1996 г. по 31 декабря 2005 г. Станция RXTE была запущена 30 декабря 1995 г. в рамках проектов NASA с космодрома им. Кеннеди. Она совершает свое движение по близкой к Земле круговой орбите на высоте 580 км, что соответствует периоду обращения в 90 мин. Контролирует спутник Центр космических полетов им. Годдарда (URL: <http://www.nasa.gov>). Экспериментальные данные представляют собой экспонированные значения 90-секундных наблюдений полного потока рентгеновского излучения S ($1.5 \div 12$ кэВ) в собственных единицах ASM. Полный поток Крабовидной туманности в диапазоне $2 \div 10$ кэВ, который в данном случае выступает эталоном, приблизительно соответствует 75 ASM ед./с. Станция RXTE предоставляет данные двух типов: усредненные посуточно (I тип) и исходные экспериментальные данные, то есть не подвергнутые предварительной обработке (II тип). Далее мы приведем результаты исследования динамики корреляций в рентгеновской активности двойной системы Cygnus X-1.

Cygnus X-1 представляет собой известный космический объект, являющийся кандидатом в черные дыры, открытый еще в 70-е годы XX века [21]. Его оптическим компонентом является голубой сверхгигант HD 226868 редкого спектрального типа O9.7 Iab радиусом $18R_{\odot}$ и массой $M_d = 33 \pm 9M_{\odot}$. Температура поверхности этой звезды составляет около 31000 К. Видимая яркость ($V = 8^m.84$) оптической звезды невелика лишь из-за того, что она удалена от нас на расстояние около 6000 св. лет. Спектральные линии звезды меняются вследствие эффекта Доплера с периодом $P = 5.6$ сут, что соответствует орбитальному периоду двойной системы. По кривой лучевых скоростей можно найти функцию масс оптической звезды, которая позволяет установить массу невидимого объекта – черной дыры как $16 \pm 5M_{\odot}$ [22]. Из атмосферы оптического сверхгиганта вещество медленно перетекает в направлении черной дыры, образуя плоский газовый аккреционный диск. Его внутренние слои из-за столкновений атомов и ионов разогреваются до температуры в десятки и сотни тысяч Кельвинов. Высвечивание этого газа дает эффект мощного источника рентгеновского излучения с довольно жестким спектром. На рис. 1 представлены два типа данных полного потока рентгеновского излучения Cygnus X-1, полученные камерой ASM. Общее число измерений суточно усредненных данных – 3357, для данных второго типа – 59748. Средний интервал между смежными измерениями (событиями) для II типа данных составил $\tau_{ev} = 88$ мин.

Ранее некоторые особенности рентгеновского излучения системы Cygnus X-1 обсуждались в работах [23, 24]. Помимо заключений об орбитальных периодах двойных систем Cygnus X-1 и GRS 1915+105 в этих работах были высказаны предположения о различиях в физических механизмах переноса вещества в исследуемых системах и пределах реализации самоподобия при описании динамики переноса. Динамика сигналов, продуцируемых Cygnus X-1, указывала на справедливость модели «случайного блуждания» в режиме аномальной диффузии для процессов переноса в аккреционном диске при реализации временного самоподобия на интервалах до 3 лет. На рис. 2 приведен спектр мощности ВКФ $\mu_0(\nu)$ (рис. 2, а) и трех функций памяти $\mu_i(\nu)$, $i = 1, 2, 3$ (рис. 2, b–d) для усредненных значений рентгеновского излучения Cygnus X-1. Спектры представлены в двойной логарифмической шкале. В частотном поведении исходной ВКФ заметна степенная зависимость $\mu_0(\nu) \sim 1/\nu^{\beta}$ с показателем фрактальности $\beta = 1.64$. В полосе низких частот $\sim 10^{-3}$ ч.е. обнаруживается серия спектральных всплесков. Пери-

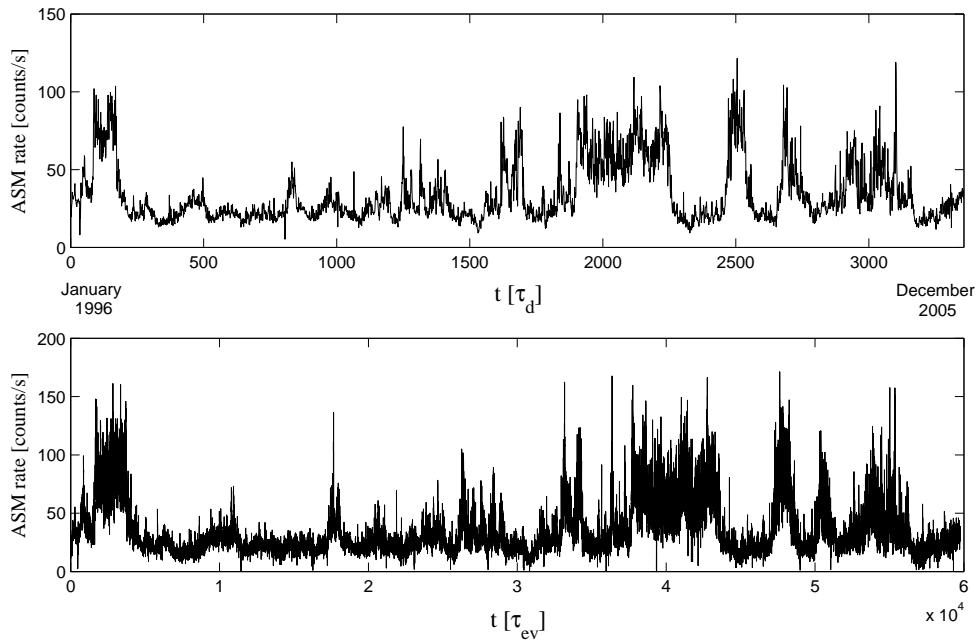


Рис. 1. Полный поток рентгеновского излучения двойной системы Cygnus X-1, фиксируемый камерой ASM станции RXTE в диапазоне 1.5 ÷ 12 кэВ. Вверху – суточно усредненные, внизу – исходные экспериментальные данные

оды ~ 1000 сут соответствуют временным масштабам реализации самоподобных особенностей рентгеновского излучения Cygnus X-1 [23]. На спектрах мощности функций памяти (рис. 2, с, d) на частотах ~ 0.18 ч.е. проявляются всплески, соответствующие орбитальному периоду $P = 5.6$ сут. В полосе средних и высоких частот на всех спектрах функций памяти выявляются периодические процессы разной амплитуды и длительности. Наложение указанных процессов приводит к достаточно сложной конфигурации мелкомасштабных флуктуаций во временной последовательности рентгеновской активности Cygnus X-1 – сильной переменности на коротких временных интервалах (вплоть до миллисекунд).

Оконно-временное представление спектров мощности (см., к примеру, для $\mu_0(\nu)$ на рис. 3, $\mu_2(\nu)$ на рис. 4) позволяет более наглядно продемонстрировать заключение о существовании длительных интервалов (~ 3 лет) реализации самоподобия и орбитального периода во временной последовательности рентгеновского излучения источника Cygnus X-1. Временная серия разбивалась на участки равной длины, для каждого из которых выполнялось построение спектра мощности. Отметим, что в оконно-временном поведении частотной зависимости $\mu_0(\nu)$ интенсивность всплесков в сверхнизкочастотной области значительно превосходит все остальные. В то же время всплеск, соответствующий орбитальному периоду двойной системы Cygnus X-1 (второе временное окно), сопоставим по амплитуде с импульсами прочих частот.

На рис. 5 представлена частотная зависимость первой меры памяти $\varepsilon_i(\nu)$, $i = 1, 2, 3$, для суточно усредненной динамики рентгеновского излучения Cygnus X-1. Численное значение параметра $\varepsilon_1(0) = 18.23$ характеризует умеренное по степени интенсивности проявление статистической памяти. В то же время значение параметра $\varepsilon_1(0)$ для данных II типа равно 33.36. Значения параметра $\delta_1(0)$ для данных I типа составляет 241.07, II типа равно 1097.7. Столь существенная скорость потери корреляционных связей свидетельствует о неоднородности структуры внутренних

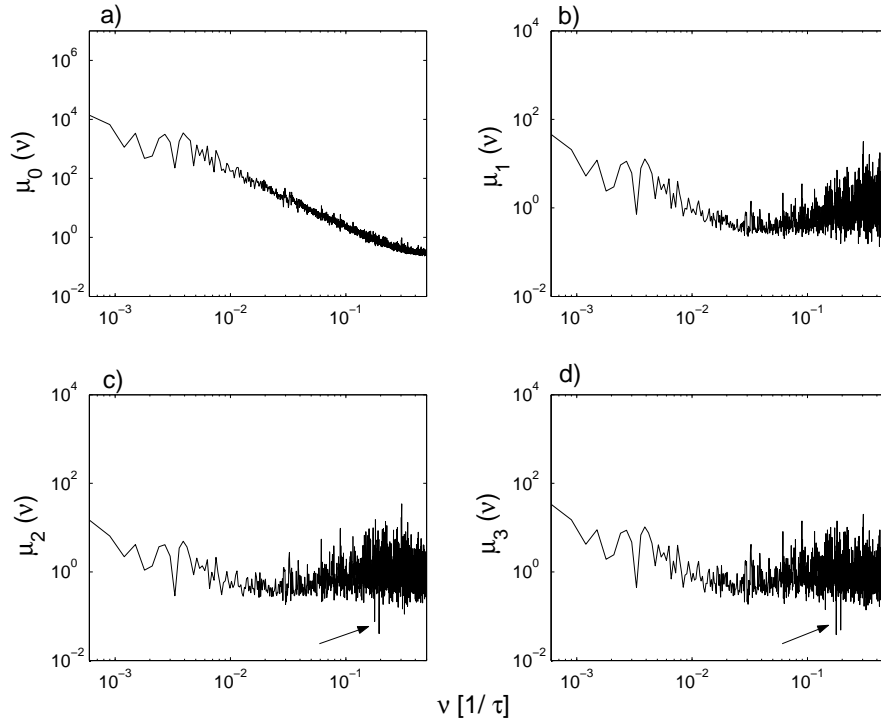


Рис. 2. Спектр мощности временной корреляционной функции ВКФ $\mu_0(\nu)$ и трех функций памяти $\mu_i(\nu)$, $i = 1, 2, 3$, для суточно усредненной рентгеновской активности двойной системы Cygnus X-1. Спектры представлены в двойной логарифмической шкале. Стрелки указывают всплески, соответствующие орбитальному периоду системы

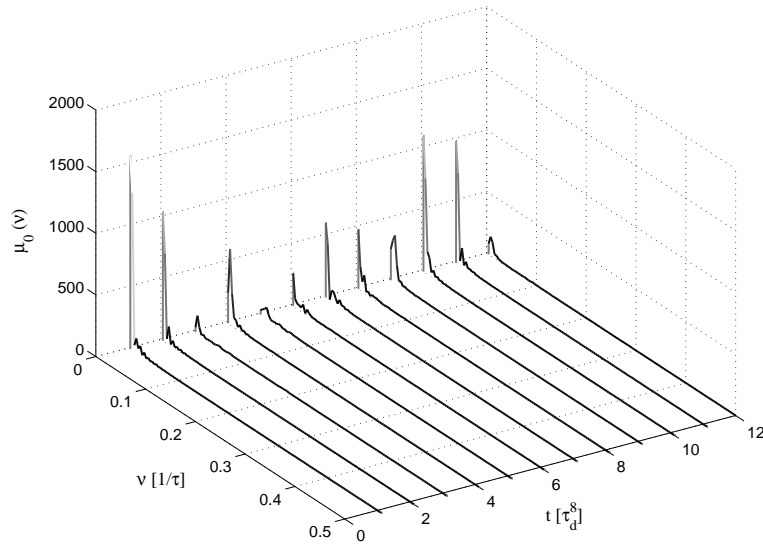


Рис. 3. Оконно-временное представление спектра мощности исходной временной корреляционной функции $\mu_0(\nu)$ в линейной шкале

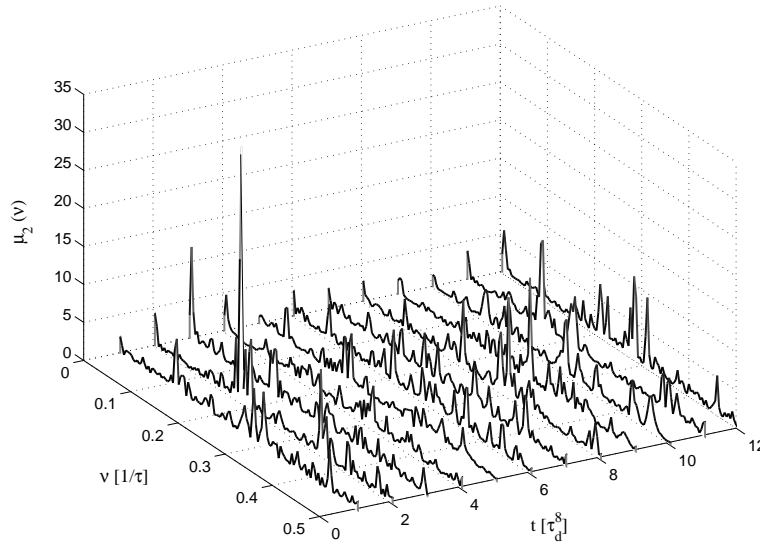


Рис. 4. Построение спектров мощности второй функции памяти $\mu_2(\nu)$ путем разбиения суточно усредненной последовательности на окна равной длины. Спектры строятся отдельно в линейной шкале для каждого окна

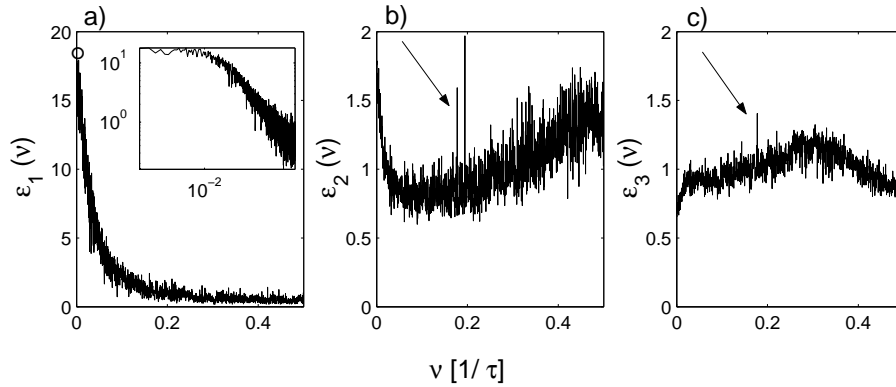


Рис. 5. Частотная зависимость меры памяти $\varepsilon_i(\nu)$, $i = 1, 2, 3$, для суточно усредненных вариаций интенсивности рентгеновского излучения двойной системы Cygnus X-1. Вкладка – низкочастотная область зависимости $\varepsilon_1(\nu)$ в двойной логарифмической шкале. Стрелки указывают на орбитальные особенности рентгеновского излучения

слоев аккреционного диска, генерирующих рентгеновское излучение, и достаточно медленной скорости переноса вещества в них. В согласии с последним выводом анализ эффектов нестационарности в рентгеновской активности двойных систем Cygnus X-1 и GRS 1915 в работе [25] указывает на меньшие величины фактора нестационарности для первой системы по сравнению со второй, хотя временные интервалы «подготовки» наиболее значимых событий, когда происходят скачкообразные изменения состояния исследуемых систем, сопоставимы (несколько сотен суток). На частотных зависимостях $\varepsilon_{1,2}(\nu)$ (рис. 5, b, c) обнаруживаются спектральные всплески, соответствующие периоду изменения лучевой скорости оптической звезды в двойной системе Cygnus X-1.

Табл. 1

Классификация рентгеновского излучения микроквазаров с учетом значений параметра $\varepsilon_1(0)$ (в порядке возрастания). Стрелками указаны направления перехода от одной группы к другой в зависимости от типа данных

I тип данных		II тип данных	
1 группа: $\varepsilon_1(0) \sim 1 \div 10$			
LSI+61303	1.03	1E1740.7-2942	1.02
RX J1826.2-1450	1.07	LSI+61303	1.11
GRO J0422+32	1.08	GRO J0422+32	1.12
XTE J1118+480	1.08	GRS 1758-258	1.12
1E1740.7-2942	1.20	SS433	1.14
SS433	1.40	RX J1826.2-1450	1.21
GRS 1758-258	1.40	XTE J1118+480	1.34
Scorpius X-1	1.64	V4641 Sgr	3.88
V4641 Sgr	1.80	XTE J0421+560	5.50
XTE J0421+560	1.86	Scorpius X-1	7.62
GRS 1915+105↓	6.06		
2 группа: $\varepsilon_1(0) \sim 10 \div 100$			
Cygnus X-3	9.86	GRS 1915+105↑	12.93
Circinus X-1	15.61	Cygnus X-3	16.03
Cygnus X-1	18.23	H1743-322	31.10
XTE J1859+226	34.95	Cygnus X-1	33.36
XTE J1550-564↓	45.69	XTE J1859+226	40.48
GX 339-4	51.35	Circinus X-1	57.81
H1743-322	52.60	GX 339-4	63.59
3 группа: $\varepsilon_1(0) \sim 100 \div 1000$			
GRO J1655-40	101.08	XTE J1550-564↑	219.83
		GRO J1655-40	248.58

5. Классификация эффектов статистической памяти рентгеновской активности микроквазаров

В табл. 1 и 2 приведены классификации динамики рентгеновской активности 19 микроквазаров в зависимости от значений параметров $\varepsilon_1(0)$ и $\delta_1(0)$ соответственно. Указанные параметры отражают проявление корреляционных взаимосвязей на масштабах порядка длины временной серии (в пределе при $(N-1)\tau \rightarrow \infty$).

Наши результаты свидетельствуют о довольно сложном стохастическом характере и взаимосвязи физических процессов, определяющих механизмы рентгеновского излучения. В динамике большей части выборки астрофизических объектов проявляются эффекты долговременной памяти – существенные времена реализации корреляционных связей (1 группа). В этом случае релаксационные процессы обладают значительной скоростью. Особый интерес представляют рентгеновские двойные звезды второй и третьей групп приведенных классификаций. Рентгеновская активность указанных объектов характеризуется более существенными временами релаксации и кратковременными эффектами статистической памяти. В целом суточное усреднение экспериментальных данных приводит к уменьшению значений $\varepsilon_1(0)$ и $\delta_1(0)$ в сравнении с параметрами, рассчитанными для неэквидистантных временных последовательностей. Это связано со «сглаживанием» флуктуационных разбросов и появлением излишней «регуляризации» исходной последовательности.

Табл. 2

Классификация рентгеновской активности микроквазаров в зависимости от значений параметра $\delta_1(0)$ (в порядке возрастания)

I тип данных		II тип данных	
1 группа: $\delta_1(0) \sim 1 \div 10$			
LSI+61303	1.04	1E1740.7-2942	1.05
RX J1826.2-1450	1.23	LSI+61303	1.23
GRO J0422+32	1.39	GRO J0422+32	1.25
1E1740.7-2942	1.46	GRS 1758-258	1.26
XTE J1118+480	1.78	SS433	1.27
SS433	2.01	XTE J1118+480	1.39
GRS 1758-258	2.11	RX J1826.2-1450	1.53
Scorpius X-1↓	2.56		
V4641 Sgr↓	3.06		
XTE J0421+560↓	5.10		
2 группа: $\delta_1(0) \sim 100 \div 1000$			
GRS 1915+105	62.04	V4641 Sgr↑	15.04
Circinus X-1↓	238.58	Scorpius X-1↑	57.36
Cygnus X-3	241.07	Cygnus X-3	96.90
Cygnus X-1↓	288.54	XTE J0421+560↑	143.55
H1743-322	664.63	GRS 1915+105	167.41
		H1743-322	1 002.7
3 группа: $\delta_1(0) \sim 1000 \div 100000$			
XTE J1859+226	1 804.7	Cygnus X-1↑	1 097.7
XTE J1550-564	2 502.3	XTE J1859+226	1 558.1
GRO J1655-40	18 204	Circinus X-1↑	3 318
GX 339-4	30 518	GX 339-4	4 207.5
		XTE J1550-564	48 483
		GRO J1655-40	62 595

Заключение

В представленной работе развивается метод статистического анализа динамики корреляций в последовательностях вариаций интенсивности рентгеновской активности 19 двойных систем. Как показывают наши предварительные исследования в большинстве случаев рентгеновская активность астрофизических объектов другого типа: квазаров, лацертид, активных галактик, пульсаров – характеризуется дальнедействующими эффектами статистической памяти. В ходе анализа выборки микроквазаров были выделены три группы временных сигналов рентгеновского излучения, характеризующиеся разной степенью проявления эффектов статистической памяти, разной скоростью потери корреляционных связей. Обнаружены объекты, для которых временная эволюция рентгеновской активности характеризуется немарковским характером (дальнедействующие эффекты статистической памяти) и значительными временами затухания корреляций, квазимарковским поведением (промежуточная по времени существования статистическая память) и марковским сценарием (короткая статистическая память) с существенными временами релаксации. Можно надеяться, что полученные результаты позволят в первом приближении провести классификацию указанной выборки микроквазаров в зависимости от характера проявления корреляции в их рентгеновской активности.

Многообразие эффектов статистической памяти в рентгеновской активности микроквазаров определяет качественно различимые процессы генерации рентгеновского излучения и приводит к необходимости проведения более комплексного

анализа временных сигналов данного класса астрофизических объектов: исследование корреляций и эффектов последствия во временных вариациях в других диапазонах энергетического спектра, анализ кросс-корреляционных (перекрестных) зависимостей фиксируемых одновременно временных сигналов разных частотных диапазонов, выявление эффектов частотно-фазовой синхронизации временной и событийной последовательностей флуктуаций рентгеновской активности микроквазаров.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект № 12-02-97000-р_поволжье_a).

Summary

S.A. Demin, O.Yu. Panishev, Yu.A. Nefedev, N.Yu. Varaksina. Dynamics Peculiarities of X-Ray Radiation of Astrophysical Objects: Classification of Statistical Memory Effects.

We show that analyzing the total flux X-ray activity of microquasars registered by the ASM (All-Sky Monitor) survey camera of the RXTE (Rossi X-Ray Timing Explorer) orbital observatory makes it possible not only to study some accretion mechanisms in binary star systems but also to carry out their classification according to the strength of the statistical memory effects. To discover the properties of X-ray activity, we analyze the power spectra of memory functions derived from the memory function formalism, using data from Cygnus X-1 as an example. The results have allowed us to determine three classes of X-ray binary systems depending on the relationship between the relaxation time scales and the existence of statistical memory.

Key words: statistical memory effects, X-ray activity, X-ray binary systems, Cygnus X-1.

Литература

1. *Weaver W.* Science and Complexity // Amer. Scientist. – 1948. – V. 36, No 4. – P. 536–544.
2. *Solomon S., Shir E.* Complexity; a science at 30 // Europhys. News. – 2003. – V. 34, No 2. – P. 54–57.
3. *Louzoun Y., Solomon S., Atlan H., Cohen I.R.* Modeling complexity in biology // Physica A. – 2001. – V. 297. – P. 242–252.
4. *Хармут Х.* Применение методов теории информации в физике. – М.: Мир, 1989. – 344 с.
5. *Zwanzig R.* Nonequilibrium Statistical Mechanics. – N. Y.: Oxford Univ. Press, 2001. – 222 p.
6. *Zwanzig R.* Memory effects in irreversible thermodynamics // Phys. Rev. – 1961. – V. 124, No 5. – P. 983–992.
7. *Zwanzig R.* Time-correlation functions and transport coefficients in statistical mechanics // Annu. Rev. Phys. Chem. – 1965. – V. 16. – P. 67–102.
8. *Mori H.* Transport, collective motion, and brownian motion // Prog. Theor. Phys. – 1965. – V. 33, No 3. – P. 423–455.
9. *Mori H.* A continued-fraction representation of the time-correlation functions // Prog. Theor. Phys. – 1965. – V. 34, No 3. – P. 399–416.
10. *Yulmetyev R.M., Hänggi P., Gafarov F.M.* Stochastic dynamics of time correlation in complex systems with discrete current time // Phys. Rev. E. – 2000. – V. 62. – P. 6178–6194.

11. *Yulmetyev R., Hänggi P., Gafarov F.* Quantification of heart rate variability by discrete nonstationary non-Markov stochastic processes // *Phys. Rev. E.* – 2002. – V. 65. – P. 046107-1–046107-15.
12. *Yulmetyev R.M., Demin S.A., Khusnutdinov R.M., Panischev O.Yu., Hänggi P.* Non-Markov Statistical Effects of X-Ray Emission Intensity of The Microquasar Grs 1915+105 // *Nonlinear Phenom. Complex Systems.* – 2006. – V. 9, No 4. – P. 313–330.
13. *Демин С.А., Юльметьев Р.М., Панищев О.Ю., Галеев А.И., Hänggi P.* Нелинейная стохастическая динамика событийных корреляций в астрофизических объектах // *Нелинейный мир.* – 2008. – Т. 6, № 10. – С. 560–578.
14. *Shurygin V.Yu., Yulmetyev R.M., Vorobjev V.V.* Physical criterion of the degree of non-Markovity of relaxation processes in liquids // *Phys. Lett. A.* – 1990. – V. 148. – P. 199–203.
15. *Шурыгин В.Ю., Юльметьев Р.М.* Пространственная дисперсия структурной релаксации в простых жидкостях // *ЖЭТФ.* – 1991. – Т. 99. – С. 144–154.
16. *Шурыгин В.Ю., Юльметьев Р.М., Воробьев В.В.* О спектре параметра немарковости релаксационных процессов в жидкостях // *ЖЭТФ.* – 1992. – Т. 102. – С. 852–862.
17. *Shurygin V.Yu., Yulmetyev R.M.* The spectrum of the non-Markovity parameter for relaxation processes in liquids // *Phys. Lett. A.* – 1993. – V. 174. – P. 433–436.
18. *Mokshin A.V., Yulmetyev R.M., Hänggi P.* Simple Measure of Memory for Dynamical Processes Described by a Generalized Langevin Equation // *Phys. Rev. Lett.* – 2005. – V. 95. – P. 200601-1–200601-4.
19. *Черепашук А.М.* Оптические исследования рентгеновских двойных систем // *Усп. физ. наук.* – 2011. – Т. 181, № 10. – С. 1097–1104.
20. *Levine A.M., Bradt H., Cui W., Jernigan J.G., Morgan E.H., Remillard R., Shirey R.E., Smith D.A.* First Results from the All-Sky Monitor on the *Rossi X-ray Timing Explorer* // *Astrophys. J.* – 1996. – V. 469, No 1. – P. L33–L36.
21. *Bolton C.T.* Identification of Cygnus X-1 with HDE 226868 // *Nature.* – 1972. – V. 235, No 2. – P. 271–273.
22. *Черепашук А.М.* Поиски черных дыр // *Усп. физ. наук.* – 2003. – Т. 173, № 4. – С. 345–384.
23. *Greenhough J., Chapman S.C., Chaty S., Dendy R.O., Rowlands G.* Characterising anomalous transport in accretion disks from X-ray observations // *Astron. Astrophys.* – 2002. – V. 385, No 2. – P. 693–700.
24. *Greenhough J., Chapman S.C., Chaty S., Dendy R.O., Rowlands G.* Identification of a 12–17 day timescale in X-ray observations of GRS 1915+105 // *Mon. Not. R. Astron. Soc.* – 2003. – V. 340. – P. 851–855.
25. *Тимашев С.Ф.* Фликкер-шумовая спектроскопия: информация в хаотических сигналах. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2007. – 248 с.

Поступила в редакцию
12.07.12

Дёмин Сергей Анатольевич – старший преподаватель кафедры вычислительной физики и МФП Казанского федерального университета; научный сотрудник Астрономической обсерватории им. В.П. Энгельгардта Казанского федерального университета.

E-mail: serge_demin@mail.ru

Панищев Олег Юрьевич – старший преподаватель кафедры вычислительной физики и МФП Казанского федерального университета; научный сотрудник Астрономической обсерватории им. В.П. Энгельгардта Казанского федерального университета.

E-mail: *opanischev@gmail.com*

Нефедьев Юрий Анатольевич – доктор физико-математических наук, профессор кафедры вычислительной физики и МФП Казанского федерального университета; директор Астрономической обсерватории им. В.П. Энгельгардта Казанского федерального университета.

E-mail: *star1955@mail.ru*

Вараксина Наталья Юрьевна – младший научный сотрудник Астрономической обсерватории им. В.П. Энгельгардта Казанского федерального университета.

E-mail: *vnu_357@mail.ru*